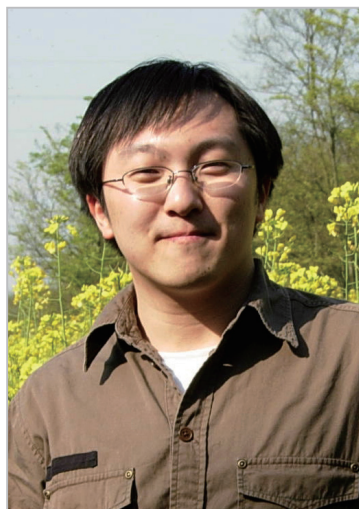


E-维修及其在商用飞机中的应用

E-Maintenance and Its Application in Commercial Aircraft Life Cycle

南京航空航天大学航空宇航学院 刘 佳

同济大学航空航天与力学学院 刘 毅



刘 佳

博士，长期从事民用飞机可靠性维修性保障性(RMS)工程的研究工作，先后参与了多项民航科技基金和国家重大工程的可靠性维修性保障性工作，其中包括ARJ21飞机可靠性工程、大型客机RMS论证和设计等。

维修既是技术活动，又是管理活动。商用飞机维修业已成为飞机制造商和航空公司的核心工作之一。其目标是在保证飞行安全的前提下，通过提高飞机的可用性，降低维修相关费用。

商用飞机维修策略先后经历了修复性维修、预防性维修和预测性维修3个主要发展阶段。1978年

e-维修不只是一种单纯的维修策略、维修计划或维修方式，而是维修领域的一场革命。e-维修可大幅提升商用飞机维修的技术与管理水平，提高商用飞机的可用性和运营可靠性，缩短维修时间，降低维修成本，必将对商用飞机的维修产生长期而深远的影响。

由美国联合航空公司的诺兰和希普提出的以可靠性为中心的维修(Reliability Centered Maintenance, RCM)被公认为维修工程发展的里程碑。它根据可靠性评估和预测结果以及持续适航要求确定维修计划，较好地解决了维修过度和维修不足的问题，有效地提高了商用飞机的可用性，降低了维修费用。1980年，美国航空运输协会(Air Transport Association of America, ATA)(现为Airlines for America, A4A)基于RCM思想制定并发布了MSG-3《运营人/制造商维修大纲制定文件》，并通过型号应用和技术进步不断完善和发展，现已成为通用的制定商用飞机初始维修大纲的指导性文件和事实上的行业标准，其最新版由A4A于2011年发布。

从图1所示的维修工程发展愿景^[1]可以看出，产品维修已成为以可靠性和维修性为中心，覆盖产品全生命周期的一项系统工程，包括产品设计、可靠性维修性保障性工程、自动化、信息与通信技术(Information and Communication Technologies, ICT)、企业管理等诸多领域。

e-维修(e-maintenance)出现于20世纪末，现已逐步应用于生产设备、交通工具的维修中，无疑也将成为商用飞机维修的发展方向。

e-维修

1 e-维修的出现

e-维修的出现和发展主要源于两方面原因：

(1) 电子信息和自动化技术的发展。

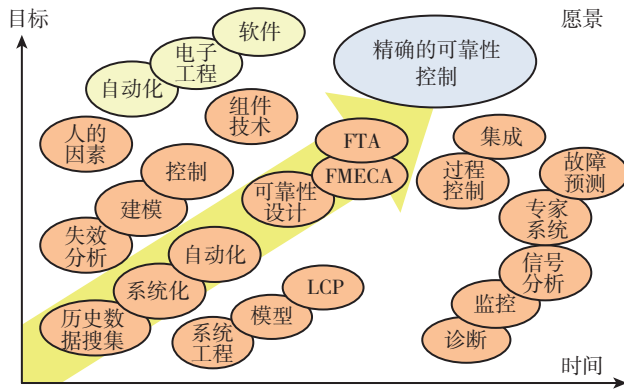


图1 维修工程发展愿景

电子信息和自动化技术的飞速发展和广泛应用增强了维修的有效性、实时性和主动性,优化了维修流程。

一方面,电子信息和自动化技术,特别是传感器技术的发展使得对维修对象的状态监控更加及时、快捷与精确,整机、系统和设备的工作状态变得更为清晰、透明,从而促进了维修由诊断型向预测型转变。

另一方面,企业可以利用 ICT 技术建立分布式智能维修系统,实现维修信息和知识的远程访问与共享,以及维修专家间的协同工作。特别是无线通信技术可大大加强远程数据传输和设备监控的能力,增强维修的灵活性和信息的可用性,降低企业获取维修相关信息的成本。

(2) 业务集成的需要。

企业运营的全面优化除了依靠信息技术,更有赖于业务集成。维修作为企业运营的重要组成部分,其决策涉及与其他业务的协调(如飞机维修与航班计划间的协调),具有系统集成的特征和全局性的影响,因此业务集成的需求在维修领域变得越来越迫切^[2]。

鉴于维修体系本身的复杂性和现有的相关软件系统的异质性,实现维修业务集成需要研究新的业务模型和方法,并实现系统的开放性和互操作性,这也成为推动 e-维修发展的主要动力之一。

2 e-维修的技术内涵

虽然学术界和工业界对 e-维修的定义尚不统一,但可根据维修的内涵,从维修策略、维修计划、维修方式和维修保障等多个角度考察 e-维修的技术内涵。

(1) 从维修策略的角度看, e-维修是一套维修管理程序,主要利用数字化技术(如状态监控、ICT 等)实时获取维修对象的状态数据,实现维修作业的信息化管理^[3-4]。

(2) 从维修计划的角度看, e-维修运用包括监控、诊断、预测、决策等在内的跨学科方法,满足 CBM、主动维修、协同维修、远程维修和实时信息访问,以及运营与维修过程集成等方面的需求^[5-7]。

(3) 从维修方式的角度看, e-维修将更多地利用 CBM、预测性维修和主动维修取代传统维修^[8],以满足企业对高可用性和低运营成本的要求。如 Koc 等^[9]就将 e-维修视作提供了监测和预知征兆功能(Predictive Prognostic Function)的预知维修系统。

(4) 从维修保障的角度看, e-维修是一种工业自动化系统,它结合了 Web 服务和代理技术,实现了智能化、协同化等特征^[2],是具有信息处理、决策支持和通信保障功能的分布式的人工智能环境。

e-维修发展和探索的重点一方面在于采用信息化手段,缩短维修时

间、节约维修资源、提高维修效率和效益;另一方面在于不断改进和完善已有维修方式,并引入新的维修方式,注重实时监控、故障诊断与预测,实施精确化维修,提高整个维修保障过程的自动化与自主化程度。此外, e-维修不再是维修对象使用者/运营商单方的事情,而是由制造商、使用者/运营商、第三方维修商等多方参与的系统工程体系和产业链。从这三方面考虑, e-维修可定义为“卓越(excellent)维修”^[10],即:

e-维修 = 卓越维修 = 高效维修(更多成果,更少人工/费用)+ 有效维修(提高可用性,保持和恢复可靠性、维修性和保障性)+ 企业维修(直接提高企业绩效)。

值得注意的是: e-维修仍然属于 RCM。由图 1 可知,目前维修工程发展的主线仍然是 RCM, e-维修主要是从技术和管理层面强化了 RCM,如更多地采用预测性维修,充分应用最新 ICT 技术提高(技术与运营)信息的集成度与即时性等。

3 e-维修的标准和架构

目前,与 e-维修平台开发相关的标准和规范主要有: IEEE 802.11x、IEC 62264、ISO 15745、MIMOSA-IEEE 1232、ISO 13374 等。其中使用较多的是机器信息管理开放系统联盟(Machine Information Management Open System Alliances, MIMOSA)提出的 CBM 开放系统架构(Open System Architecture for Condition-Based Maintenance, OSA-CBM)^[11]和企业应用集成开放系统架构(Open System Architecture for Enterprise Application Integration, OSA-EAI)^[12]。

3.1 OSA-CBM

OSA-CBM 的主要目标是为分布式的 CBM 软件模块制定开放的标准化架构,使不同厂商的软硬件具有互换性和互操作性。按照 OSA-CBM 模型,各专业厂商可专注于自身的优势技术与产品,不必各自开发互不兼

容的CBM系统。CBM系统的开发人员则可直接选用适合的软硬件产品,从而降低系统的开发和维护成本,增强系统的集成能力。

OSA-CBM实现了ISO-13374,为ISO-13374的6个数据处理功能层次定义了数据结构和接口。这6个层次自底向上如图2所示。

(1)数据采集(Data Acquisition)层:为CBM系统提供数字传感器或模拟传感器数据。

(2)数据处理(Data Manipulation)层:输出数字化过滤信号、频谱分析信号、虚拟传感器信号以及其他设备状态特征信号。

(3)状态检测(State Detection)层:将状态特征数据同设定的阈值进行比较,若发现异常则产生警告。

(4)健康评估(Health Assessment)层:确定所监控部件或系统的健康状况,生成诊断记录,判断故障发生的可能性。

(5)预测性评估(Prognostics Assessment)层:在综合处理前面各层所获得数据,考虑设备未来使用条件的基础上,预测未来某一时期设备的健康状况或剩余寿命。

(6)决策支持(Decision Support)层:产生对设备使用和维修的决策,包括设备是否需要维修,何时维修,以及如何使用设备以使其在完成当前任务之前不出现故障。

OSA-CBM模型采用面向对象设计,其内容表述采用统一建模语言(Unified Modeling Language, UML)和抽象接口描述语言(Abstract Interface Definition Language, AIDL)2种方式,二者表述的内容完全相同。OSA-CBM的实现可采用多种中间件技术。为推广该标准的应用, MIMOSA相继推出了OSA-CBM模型的CORBA、COM/DCOM、.NET、XML等多种实现规范,将AIDL模型转换为具体的技术表述,并开发了应用验证系统。

3.2 OSA-EAI

OSA-EAI的主要目标是为在不同CBM系统间交换复杂的维修信息提供标准协议,建立统一的、开放的、分布式的、跨企业、跨系统的信息架构。OSA-EAI包括五部分,如图3所示。

(1)开放的对象注册管理(Open Object Registry Management):维护和管理维修相关对象及对象间关系的网络平台,是其他4个部分的数据

核心。

(2)开放的可靠性管理(Open Reliability Management):用于可靠性管理,支持持续改进全系统全寿命周期的可靠性、持续RCM分析、组件追踪、问题报告、备件优化分析、故障原因分析等功能。

(3)开放的状态管理(Open Condition Management):用于状态信息管理,遵从ISO-13374标准进行状态检测与诊断,使用通用测量定位技

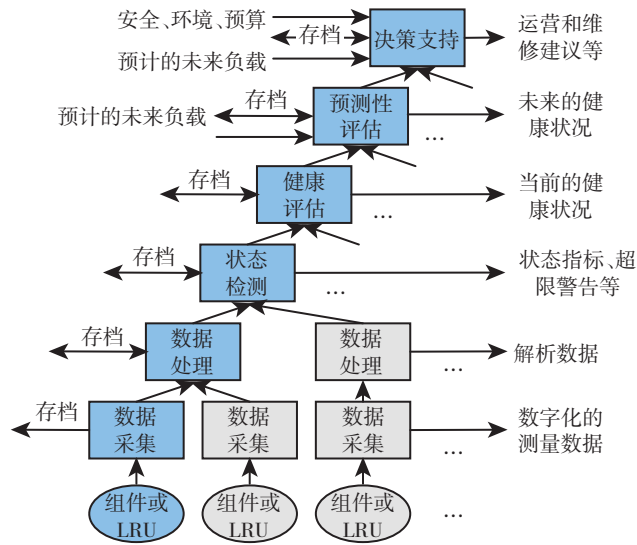


图2 ISO-13374定义的数据处理功能层次

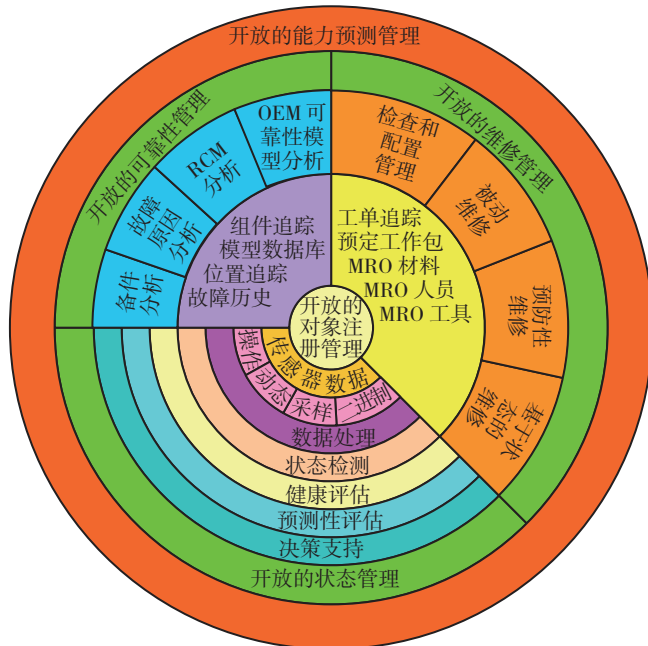


图3 OSA-EAI架构

术管理传感器,管理来自操作过程监控、振动/声音检测、油/液/气样本分析等的元数据、初始数据和计算数据,支持智能代理诊断分析、预测分析、剩余寿命评估、未来失效模式概率分析等功能,是 OSA-CBM 在 OSA-EAI 中的实现。

(4) 开放的维修管理(Open Maintenance Management):用于维修信息管理,支持修复性维修、预防性维修和基于状态的维修等多种维修方式,支持预定义工作包,支持维修工作单以及所需备件、耗材、人员和

建立了设备维护信息的关系数据模式,涵盖了 CBM 系统所要管理的全部信息,主要包括被监控系统配置描述、跟踪资源列表、系统功能描述、故障模式及影响描述、操作事件记录、监控系统与单元特征描述、传感器数据记录、报警阈值和触发报警记录、维修决策记录等。CRIS 是获取与存储静态 CBM 数据的体系结构,已被 OSA-CBM 采用,作为分布式维修应用的核心架构。CCOM 与 CRIS 共同构成 OSA-EAI 的信息构架,如图 4 所示。

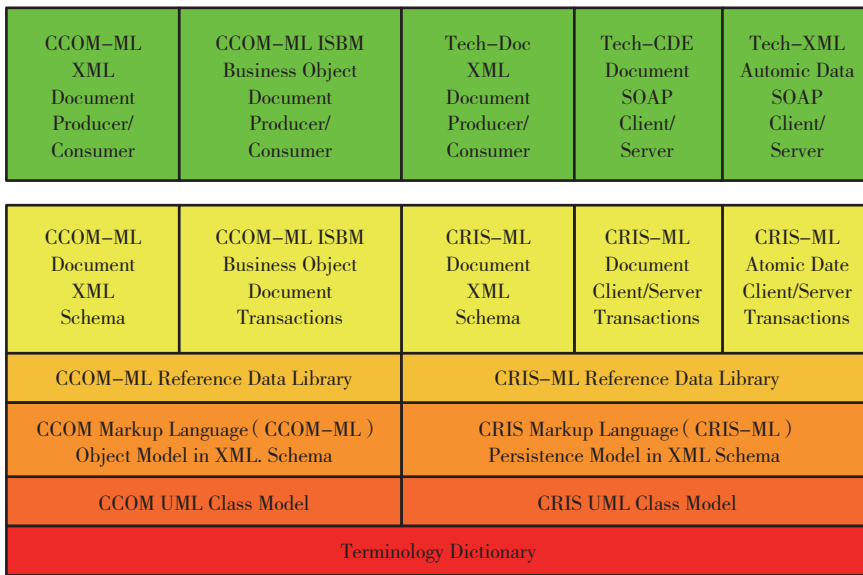


图4 OSA-EAI的信息构架

工具的追踪,支持维修管理系统与状态管理系统、可靠性管理系统间的数据交换。

(5) 开放的能力预测管理(Open Capability Forecast Management):用于能力预测,支持生产或运营预测与决策,支持实时的原料/设备可用性、人员可用性和仓储能力评估。

公共概念对象模型(Common Conceptual Object Model, CCOM)是 OSA-EAI 的基本概念模型,它使用 UML 定义了 OSA-EAI 的基类、主要属性和类之间的关联。公共关系信息模式(Common Relation Information Schema, CRIS)是 OSA-EAI 的核心,

性,乃至整个航空运输系统的运营能力,商用飞机必须具备快速准确的定位和预测故障的能力,进一步减少维修造成的延误,同时不断降低维修相关费用。

2 技术架构

更高水平的运营能力必然要求采用 CBM 和综合健康管理,这也正是 e-维修的核心所在。商用飞机的 e-维修系统需要将机上维修和地面维修视为整体,借助监控方法和技术,研究开发能够将非计划维修转化为动态计划维修的原理、技术和方法。

图 5 所示为 OSA-CBM 在商用飞机维修中的实现架构,而 OSA-CBM 各层与商用飞机维修各功能域的关系如图 6 所示。为适应商用飞机维修的需要,在 OSA-CBM 模型基础上增加了结果呈现层和维修活动层。结果呈现层根据接受信息的用户和设备不同以不同形式展示 OSA-CBM 模型 1~6 层中的数据,以使人机交互。维修活动层则对应了商用飞机运营和维修活动的计划和执行过程。

实现构架中,机上部分主要负责数据的实时采集和处理、状态检测、健康评估,以及部分预测功能(提供给机组)。地面部分主要负责分析数据、预测飞机健康状况、提出维修建议,进而做出维修决策。机上和地面部分通过空地数据链连接。

飞机飞行期间,机上传感器实时采集、处理或监控整机、系统和设备的性能或状态数据,经中央维修系统处理后通过空地数据链下传到地面。地面部分根据机上数据、飞机运行环境与负载情况、单机履历等综合分析预测该飞机、系统和设备的退化情况以及剩余寿命,并结合机队的实时健康状况、维修历史等信息提出维修建议,从而在飞机发生故障前制定维修计划,安排维修相关业务活动(如采购备件等),并在适当的时候实施维修工作。由于部分维修活动预先在

面向商用飞机的 e-维修

1 维修要求

数据显示,维修通常占航空公司直接运营成本的 20%。过去 30 年,尽管航空公司已将很多维修活动外包,但该比例一直没有明显变化。而这其中还存在效率和安全问题。效率问题主要体现在航线维修人员获取信息通常用去维修时间的 30%。安全问题主要涉及人的差错,因为维修人员通常在时间很紧的情况下完成任务,这又会进一步带来约 15% 的差错。

可见,为了提高商用飞机的可用

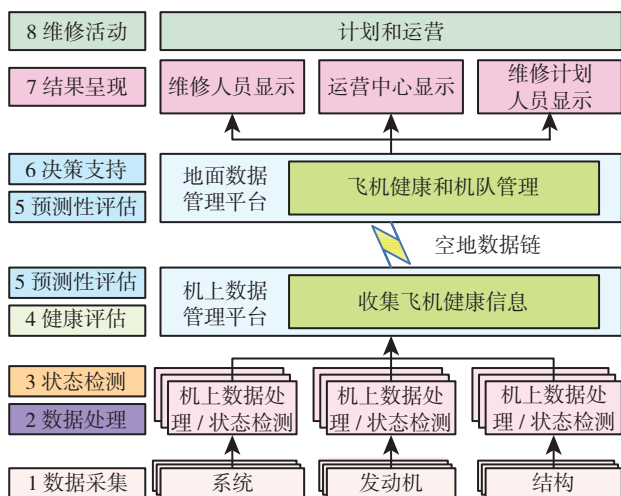


图5 OSA-CBM在商用飞机维修中的实现架构

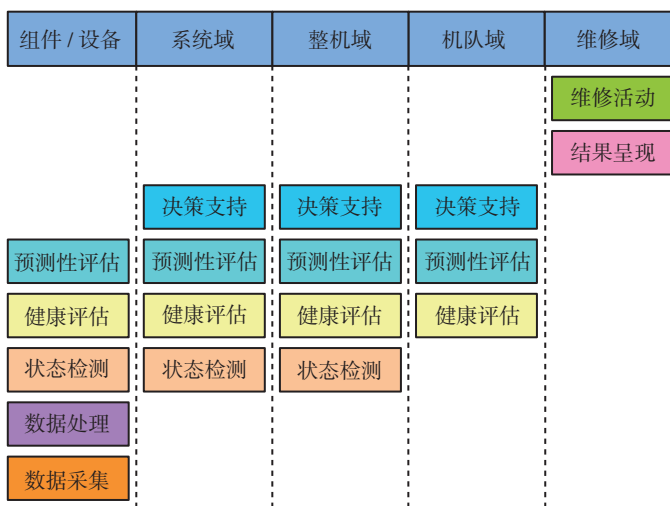


图6 OSA-CBM与商用飞机维修功能域的关系

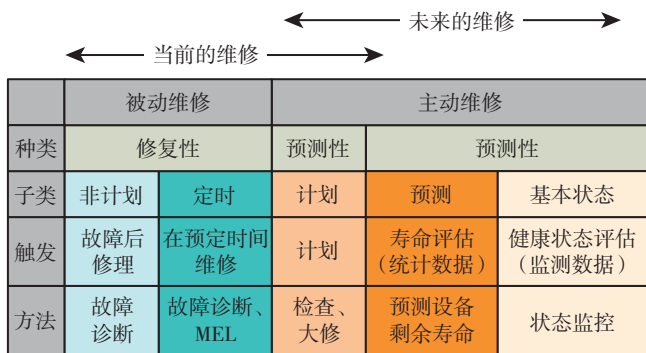


图7 维修方式的转变

地面做出决策与安排,而不必等到航后,可大大缩短维修时间,实现商用飞机维修由修复性/预防性维修到预测性/主动维修的转变,如图7所

示。从数据集成的角度看,商用飞机的e-维修涉及大量的参与者,机上部分包括发动机、起落架、结构、航电

和电气系统等,地面部分包括航空公司、飞机制造商、MRO 供应商和适航部门等。将这些参与者联系在一起的最佳途径是利用新兴 ICT 技术,遵从 OSA-EAI 规范建立数据管理平台,以便于传输维修信息,提高通信效率。

从处理过程的实时性看,实时过程主要包括数据采集、处理和状态检测(OA-CBM 的 1~3 层),非实时过程主要包括健康评估、预测性评估、决策支持、结果呈现和维修活动(OA-CBM 的 4~8 层)。围绕状态检测和健康评估(OA-CBM 的 3~4 层)存在一个灰色区域,在此区域内采用实时还是非实时处理过程,应视系统和设备的灵活性、适应性和配置情况而定。

3 应用与研究现状

商用飞机的 e-维修主要采用结合了修复性维修、预防性维修、基于状态的维修(Condition-Based Maintenance, CBM)等多种维修方式在内的预测性维修策略。

在应用方面, Airbus 公司在 A380 飞机项目中全面开展了 e-维修工作。A380 上安装了众多状态监控传感器,通过机载维修系统(Onboard Maintenance System, OMS)和机载信息系统(Onboard Information System, OIS)对飞机进行全面监控。这两个系统是 A380 的机载网络和神经中枢,不但能收集飞机各系统、发动机的故障信息,还与客舱监控装置相连,可为飞行操控、机组乘员和维修应用软件提供支持,并通过实时空地数据链将故障信息下传至地面。在地面, Airbus 公司的 AIRTAC (Aircraft Technical Aircraft-on-ground Centre) 实时接收下传的故障信息,并由 AIRTAC 工程师及时做出响应,在最短时间内提供维修建议。

Airbus 公司还通过服务整合,推出了优化飞行与地面运营的服务套件——e-Solutions^[13]。其中与维修直

接相关的软件和服务包括:

(1) ADOC 套件: 国际化、模块化的数字化维修文档管理解决方案;

(2) AirN@v: 维修工程技术数据咨询工具;

(3) AIRMAN-web: 实时飞机健康监控和故障隔离在线解决方案;

(4) Repair Manager: 结构损伤管理在线解决方案;

(5) e-Logbook: 用于优化飞机技术状态的飞行和维修活动报告管理工具。

波音 777 飞机使用中央维修系统收集子系统的故障报告, 判断故障原因, 推荐修理方法。该系统包括两部分功能: 中央维修计算功能(Central Maintenance Computing Function, CMCF)在故障发生后进行故障检测; 飞机状态监控功能(Airplane Condition Monitoring Function, ACMF)通过采集数据预测将要发生的问题。故障信息可通过飞机通信寻址与报告系统(Aircraft Communication Addressing and Reporting System, ACARS)下传至地面。

波音 787 飞机采用了 Honeywell 公司基于模型的 CMCF 和 ACMF 技术, 使飞机健康管理功能成为机组信息系统/维修系统(Crew Information System/Maintenance System, CIS/MS)的组成部分。CIS/MS 提供了一种网络化基础设施, 使机载功能与地面部件相结合, 可将飞机的监控信息和维修需求通过 ACARS、Gatelink、Connexion 或 Inmarsat 的 Swift64 卫星等宽带通信链路上传到地面。

Boeing 公司还推出了与 Airbus 公司 e-solutions 类似的服务——e-Enabled Advantage, 主要包括发动机健康检测、飞机状态检测、持续参数记录、构型管理等功能。其飞机健康管理服务利用高带宽信息通道赋予航空公司实时监控整个机队发动机和机体的能力。维修人员可以在

飞机飞行期间检测飞机系统故障, 快速决策维修是否可以推迟到临近的计划维修中, 并通知运营部门在不变更飞机计划的前提下可否及时完成必要的修理, 从而有效避免非计划维修。

巴西 Embraer 公司的 E170/190 系列支线飞机率先使用了 Honeywell 公司的 Primus Epic 机载维修系统, 其健康管理功能与波音 777 类似, 包括实时故障监控、与数据加载系统集成、点击式直觉导航、开放式结构、可加载的诊断信息数据库、总线参数和状态显示能力、远程终端连接等。这一系统使 E170/190 飞机的直接维修成本有望比波音 717、波音 737 以及 A320 低 20%, 比 Bombardier 公司支线飞机低 30%。

此外, Dassault 公司也为其 Falcon 系列公务机开发了 e-维修系统^[4]。该系统允许 Falcon 飞机的技术或服务人员使用 Dassault 公司提供的笔记本电脑, 通过 Wi-Fi 或卫星通信, 远程访问飞机上的中央维修计算机(Central Maintenance Computer, CMC)或其他维修应用程序, 以便诊断和隔离故障。未来还将提供直接访问飞机数字样机、远程电子签收等高级技术和商务功能。

在研究方面, 2004 年 3 月起, 来自欧洲、以色列和澳大利亚的 12 个国家的 57 个实体(后扩大为 60 个)在欧盟框架 6 的资助下合作启动了 TATEM (Technologies And Techniques for nEw Maintenance concepts)项目, 目标是使航空公司运营成本在未来 10 年内降低 20%, 20 年内降低 50%, 以确保欧洲航空制造业在当代及新一代飞机的设计和保障中保持竞争力。项目成员包括 GE、Airbus、Eurocopter、EADS、Alenia、Thales、Safran Group、BAE Systems、Air France 和 SRT 等。该项目研究和验证了将非计划维修转化为计划维修的原理、技术和方法, 演

示了如何利用监控技术实现综合健康管理, 以提高飞机的运营能力。项目历时 4 年, 耗资 4000 万欧元。

4 发展方向

开展面向商用飞机的 e-维修应重视以下理论、技术和方法的研究:

(1) 能够将数据转化为系统健康信息的信号处理技术(如模糊逻辑、神经网络、基于模型的推理技术等);

(2) 可将从飞机(航电系统、电气系统、发动机和结构等)上采集的数据传送到预测和诊断系统中的新兴机载传感器技术;

(3) 确认和定位失效与故障的诊断方法;

(4) 设备和系统失效与故障的预测方法;

(5) 产生面向过程的信息和指导(指令)的决策支持方法;

(6) 可在工作地点为维修人员提供信息、数据和建议的人机接口技术(如 PDA 等各种便携式设备);

(7) 基于 3D 技术的维修手册, 以及基于虚拟现实/增强现实技术的维修培训;

(8) 无线网络和卫星通信技术的建设与应用。

结束语

通过分析 e-维修的技术内涵和相关架构, 及其在商用飞机维修领域的研究与应用情况可以看出, e-维修不只是一种单纯的维修策略、维修计划或维修方式, 而是维修领域的一场革命。e-维修可大幅提升商用飞机维修的技术与管理水平, 提高商用飞机的可用性和运营可靠性, 缩短维修时间, 降低维修成本, 必将对商用飞机的维修产生长期而深远的影响。

本文共有参考文献 14 篇, 因篇幅有限, 未能全部列出, 如有需要, 请向本刊编辑部索取。

(责编 夏宛)